

ISSN 2079-5459. Вісник НТУ «ХПІ». 2013. № 43 (1016)

Применение внешнего магнитного поля при холодной деформации сталей / М.В. Краев, В.А. Гринкевич, В.С. Краева, В.Ю. Щетинин // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2011. – № 7. – С. 53–55; 7. Краев М.В., Краева В.С., Гринкевич В.А., Шевченко Т.Н. Подготовка экспериментального исследования штамповки с применением слабого магнитного поля // *Обработка материалов давлением*. 2012, №4(33), с.122-125.

Надійшла до редколегії 04.11.2013

УДК 621.73

**Экспериментальное исследование влияния слабого по энергии внешнего магнитного поля на свойства углеродистых сталей / Гринкевич В. А., Краев М. В., Шевченко Т. Н., Краева В. С. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Нові рішення у сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2013. – № 43 (1016). – С. 6–66. Бібліогр.: 7 назв.**

Описані перспективи використання зовнішнього магнітного поля при обробці металів. Представлені умови експериментальних досліджень по виявленню впливу слабого по енергії зовнішнього магнітного поля на властивості вуглецевих сталей в умовах холодної пластичної деформації. Приведені результати металографічного аналізу зразків із вуглецевих сталей, які випробовувались на розтяг та стиснення.

**Ключові слова:** магнітне поле, вуглецеві сталі, мікроструктура, розтягування, стиснення.

The outlooks of using an external magnetic field during processing metals are described. The conditions of experimental researches for detecting an impact of an energetically weak external magnetic field on properties of carbon steel under conditions of a cold plastic deformation. The results of a metallographic analysis of samples of carbon steel are presented, which were exposed to extension and compression tests.

**Key words:** magnetic field, carbon steel, structure, tensile, compression.

УДК 620.178.152.28

**А. В. ГРУШКО**, канд. техн. наук, доц., ВНТУ, Вінниця

## **ИЗУЧЕНИЕ ДВУХПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ СТЕПЕННОЙ КРИВОЙ УПРОЧНЕНИЯ НА ОСНОВЕ ТВЕРДОСТИ И ХАРАКТЕРИСТИК ПРОЧНОСТИ МЕТАЛЛА**

В работе предложены методы построения кривых упрочнения на основе стандартных механических характеристик материала – твердости Бринелля в сочетании с данными пределов прочности и текучести при растяжении. Аппроксимация кривых упрочнения принята в виде степенной функции по П. Людвигу. Построены номограммы, показана особенность методов и их точность на примере 8 различных материалов.

**Ключевые слова:** кривая упрочнения, твердость по Бринеллю, предел прочности, предел текучести, степенная функция.

**Введение.** Получение кривых упрочнения (КУ) экспериментальным путем не всегда представляется возможным из-за возможного отсутствия исследуемого металла, необходимого оборудования или сложности изготовления заготовок. Такие задачи могут возникать при: моделировании процессов обработки металлов давлением (ОМД); проведении специальных экспертиз деталей, конструкций, нагружаемых за пределами упругости; необходимости проведения обработки данных экспериментальных исследований, опубликованных в литературных источниках; необходимости оценить соответствие КУ и его характеристик прочности и пр. Также данные литературных источников о КУ [1–5] далеко не полностью отображают используемые для холодной ОМД металлы и сплавы, в том числе с учетом его термообработки. Впрочем, для большинства металлов, как правило, известны

стандартные механические характеристики – твердость, пределы прочности и текучести при растяжении [6].

Следует отметить, что КУ даже для одного и того же материала могут существенно отличаться. Так, на рис. 1 показаны кривые упрочнения отожженной стали 20Х, взятые из источников [1, 7], а также полученные опытным путем в условиях сжатия коротких образцов для двух различных партий поставки после отжига (по ГОСТ 25.503-97 «Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Метод испытания на сжатие»). Как видно, все кривые статистически значимо отличаются друг от друга. В результате, например, расчетные силы одноосного сжатия заготовок до степени деформации 0,6 для металлов, КУ которых показаны на рис. 1 (графики 1 и 4), будут отличаться примерно на 30%. Следовательно, важно иметь надежный и простой способ идентификации КУ, исключающий трудоемкие исследования.

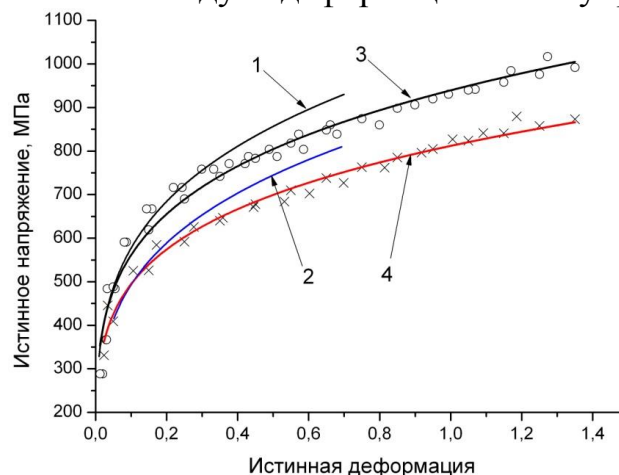
**Анализ последних исследований и литературы.** П. Людвиг [8] впервые предложил использование степенных функций упрочнения. Простейший вариант функции часто называют первым уравнением П. Людвига

$$\sigma_i = Ae_i^n, \quad (1)$$

где  $\sigma_i$  – истинное напряжение;

$e_i$  – истинная деформация;

$A$  и  $n$  – показатель и модуль деформационного упрочнения.



- 1 – кривая, полученная на основе [7] ( $A = 1015$  МПа,  $n = 0,25$ ); 2 – кривая, полученная на основе [1] ( $A = 890$  МПа,  $n = 0,26$ ); 3 – 1-я партия ( $A = 939 \pm 8$  МПа,  $n = 0,22 \pm 0,01$ ;  $HB = 1460$  МПа); 4 – 2-я партия ( $A = 813 \pm 5$  МПа,  $n = 0,22 \pm 0,01$ ;  $HB = 1300$  МПа);

Рис. 1 – Кривые упрочнения стали 20Х (термообработка – отжиг)

Достоинством аппроксимации (1) является: легкость интегрирования функции; ясность физического смысла ее коэффициентов ( $n$  равен логарифмической деформации начально изотропного материала, соответствующей пределу прочности в опытах на растяжение,  $A$  – истинное напряжение при единичной деформации); наличие всего двух неизвестных; достаточная точность в области развитых пластических деформаций (0,1...1) – корреляция для широкого круга металлов составляет 90-97%.

А.Д. Матвеев предлагает рассчитывать параметры кривой упрочнения, представляемой в виде трехпараметрической степенной зависимости Г. Свифта

$\sigma_i = A_2(e_0 + e_i)^{n_2}$ , используя значения пределов прочности и текучести (приведено в [4]). С.И. Губкин [9] использовал формулы расчета коэффициентов в аппроксимации (1) на основе относительного сужения образца после разрыва и истинного напряжения в наименьшем сечении шейки  $\sigma_{sh}$ . Для использования этих подходов необходимо знать параметры  $e_0$  или  $\sigma_{sh}$ , что снижает практическую их ценность. Рекомендации для расчета коэффициента  $e_0$  в отсутствуют, а определение  $\sigma_{sh}$  требует проведения эксперимента на растяжение.

В работах автора исследованы зависимости параметров кривой упрочнения от исходной твердости [10, 11], от пределов прочности и текучести [12, 13].

Для расчета параметров зависимости (1) следует использовать как минимум 2 независимых условия. Так, в работе [13], использована связь аппроксимации (1) со значениями пределов прочности и текучести, которая соответствует следующим выражениям

$$\sigma_u = A \cdot \exp(-n) \cdot n^n, \quad (2)$$

$$\sigma_{0,2} = A \cdot 0,002^n, \quad (3)$$

где 0,002 – допуск на пластическую деформацию.

При известном допуске на пластическую деформацию  $e_m$ , в том числе при наличии площадки текучести на диаграмме растяжения, вместо 0,002 в (3) следует использовать значение  $e_m$ .

Решение систем уравнений (2), (3) дает результаты с большим доверительным интервалом, что ограничивает использование метода [12].

В работе [10], при помощи метода конечных элементов получена эмпирическая связь кривой упрочнения в виде (1) с твердостью по Бринеллю  $HB$  (внедрение стального шарика диаметром 0,01 м с силой 29,43 кН):

$$HB = -810,4 + 965,8n^{0,349} + 19,05A^{0,798} - 19,51n^{0,349}A^{0,798}. \quad (4)$$

Отклонение значений  $HB$  по (4) и полученных в результате моделирования МКЭ составляет не более 3,5% при доверительном интервале 99,9%, и не более 1% при доверительном интервале 95%. Пределы изменения аргументов в выражении (4)  $0,05 \leq n \leq 0,5$ ;  $500 \leq A \leq 1500$  МПа. Отмечено слабое влияние модуля Юнга и коэффициента Пуассона на величину  $HB$ .

Дополнительным условием к уравнению (4) в работе [11] предлагается использование зависимости предела прочности от твердости в виде

$$\sigma_u = a + b \cdot HB, \quad (5)$$

где  $a$  и  $b$  – эмпирические коэффициенты, зависящие от вида материала.

Недостатком метода, использующего формулы (4) и (5) является необходимость задания коэффициентов  $a$  и  $b$ , которые существенно зависят от состояния поставки и термообработки металла.

Таким образом, актуальным является развитие отмеченных методов, для более корректного и точного выявления связи стандартных характеристик и кривой упрочнения металлов в холодном состоянии.

**Целью исследований** является разработка и проверка методов определения коэффициентов аппроксимации  $A$  и  $n$  кривой деформационного упрочнения металла в холодном состоянии в зависимости от твердости по Бринеллю  $HB$  в сочетании с данными пределов прочности и текучести.

**Материалы исследований.** За основу разрабатываемого метода примем связь КУ с твердостью в виде (4). В качестве дополнительных условий – зависимости (2) и (3). Таким образом имеем следующие системы уравнений:

- систему, связывающую функционально предел прочности (2), твердость (4) и аппроксимацию (1)

$$\left. \begin{aligned} \sigma_u &= A \cdot \exp(-n) \cdot n^n; \\ HB &= -810,4 + 965,8n^{0,349} + 19,05A^{0,798} - 19,51n^{0,349}A^{0,798}. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

- систему, связывающую зависимости предела текучести (3) с (4) и (1)

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{0,2} &= A \cdot 0,002^n; \\ HB &= -810,4 + 965,8n^{0,349} + 19,05A^{0,798} - 19,51n^{0,349}A^{0,798}. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

При одновременно известных пределах прочности, текучести и твердости система становится переизбыточной

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{0,2} &= A \cdot 0,002^n; \\ \sigma_u &= A \cdot \exp(-n) \cdot n^n; \\ HB &= -810,4 + 965,8n^{0,349} + 19,05A^{0,798} - 19,51n^{0,349}A^{0,798}. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Ее решение может быть найдено методом наименьших квадратов. В этом случае следует учитывать, что точность выражения, связывающего параметры кривой упрочнения и твердость по (4), среди выражений, входящих в (8), является самой высокой. Гипотетически точность выражения (2) несколько выше (3), что делает предпочтительным использование  $\sigma_u$  и  $HB$ . Последнее относится для металлов с выраженной площадкой текучести на диаграмме растяжения.

В предположении одинаковой точности выражений (2) и (3) показатель упрочнения  $n$  может быть найден как среднее арифметическое по двум решениям (6) и (7).

**Результаты исследований.** Решение систем уравнений (6) и (8) показано в виде номограмм (рис. 2, 3) относительно нахождения параметра  $n$  по каждой паре значений –  $(HB, \sigma_{0,2})$  и  $(HB, \sigma_u)$ .

Модуль упрочнения находится из выражения (4) или при помощи номограммы (рис. 4).

Для примера, на рисунке 5 показаны кривые упрочнения стали 38Х2МЮА, построенные различными методами. Эталонную кривую (1) получили в опытах на сжатие коротких образцов. Корреляция кривой 1 с экспериментальными точками достигает 97%. Как видно из рисунка,

расхождение расчетных графиков 2 (по  $HB$ ,  $\sigma_u$ ) и 3 (по  $HB$ ,  $\sigma_{0,2}$ ), а также кривой 4, построенной на основе среднеарифметических значений  $A$  и  $n$  от опытных точек незначительно.

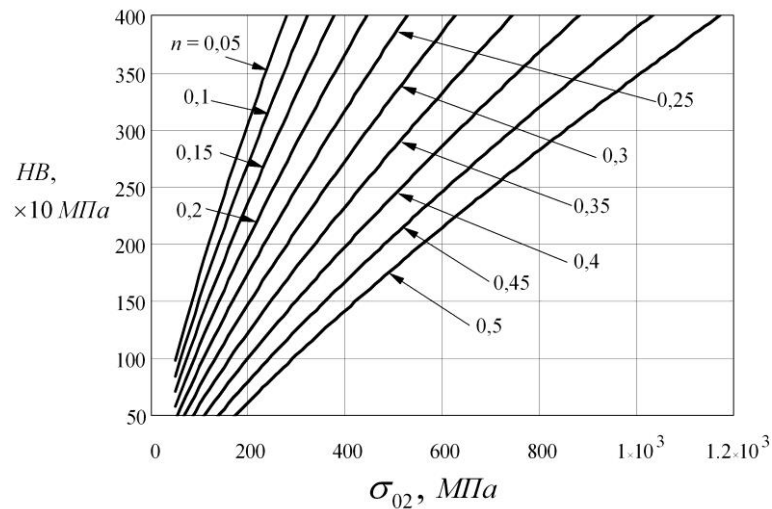


Рис. 2 – Номограмма определения показателя  $n$  по  $HB$ ,  $\sigma_{0,2}$

Также исследованы кривые упрочнения ряда металлов и сплавов, результаты которых отображены в сводной таблице. Особенности расположения и точность кривых разных материалов в целом соответствуют рис. 5.

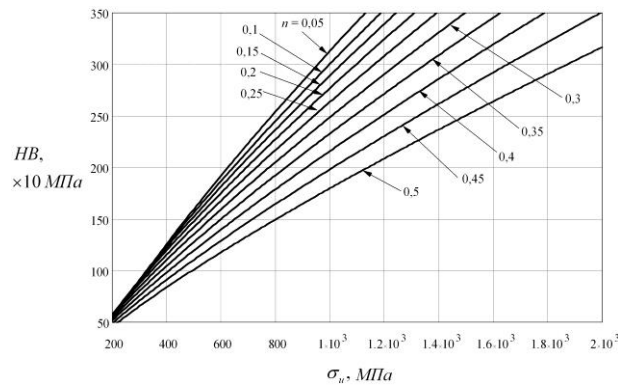


Рис. 3 – Номограмма определения показателя  $n$  по  $HB$ ,  $\sigma_u$

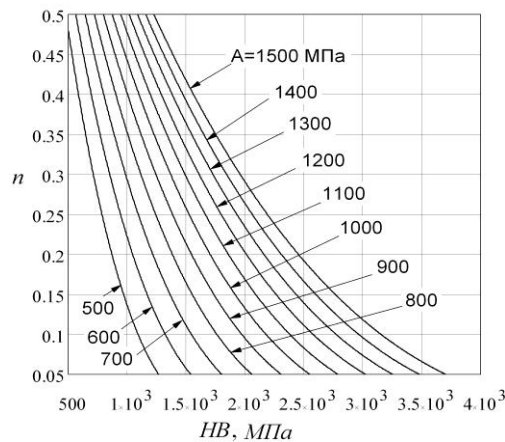
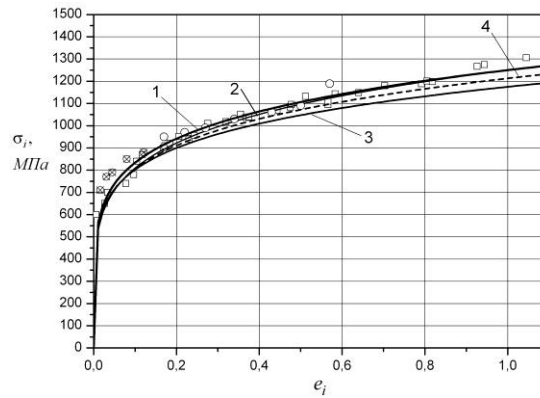


Рис. 4 – Номограмма определения модуля упрочнения  $A$



1 – сжатие коротких образцов; 2 – по твердости Бринелля  $HB$  и пределу прочности;  
3 – по твердости Бринелля  $HB$  и пределу текучести; 4 – по твердости Бринелля  $HB$   
и пределам текучести и прочности;

Рис. 5 – Кривые упрочнения стали 38X2МЮА

Таблица – Проверка определения  $A$  и  $n$  по  $\sigma_{0,2}$ ,  $\sigma_u$  и  $HB$

Материал, термообработка	Эксперимент					Расчет $A$ (МПа) и $n$					
	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_u$ , МПа	$HB$ , МПа	$A$ , МПа	$n$	по (6)		по (7)		по (8)	
						$A$	$n$	$A$	$n$	$A$	$n$
Сталь 45 нормализация	390	700	2100	1100	0,155	1077	0,148	1155	0,175	1116	0,162
Сталь 20 отжиг	220	440	1300	730	0,205	757	0,213	719	0,191	738	0,202
Сталь 20Х отжиг	230	510	1460	939	0,22	915	0,241	850	0,21	883	0,226
Сталь 30Х3МФА улучшение	1050	1225	3680	1525	0,069	1600	0,074	1507	0,058	1554	0,066
Сталь 30Х3МФА	390	700	1930	1082	0,227	1270	0,249	987	0,149	1129	0,199
Сталь 38Х2МЮА улучшение	760	1080	3170	1488	0,121	1571	0,12	1541	0,114	1556	0,117
Сталь 38Х2МЮА	420	755	2180	1255	0,176	1250	0,189	1175	0,166	1213	0,178
Титан ВТ6 отжиг	950	1100	3350	1350	0,061	1425	0,071	1349	0,056	1387	0,064

**Выводы.** Использование предложенных методов определения коэффициентов аппроксимации по П. Людвигу является достаточно удобным, вследствие использования наиболее общих, стандартных характеристик прочности металлов и сплавов. Кривые упрочнения, рассчитанные по этим методам являются оценочными, поэтому их следует применять в случаях: а) при необходимости получить кривую упрочнения для анализа уже проведенных ранее экспериментальных исследований процессов ХПД, в которых величины  $HB$ ,  $\sigma_{0,2}$  и  $\sigma_u$  для обрабатываемого металла получены опытным путем и когда прочие свойства металла в пластической области неизвестны; б) с целью получения кривой упрочнения металла (сплава), при ее отсутствии в литературных источниках (но при известных  $HB$ ,  $\sigma_{0,2}$ ,  $\sigma_u$ ), а также при невозможности проведения непосредственного испытания образцов на сжатие, растяжение, твердость и пр.; в) для разбраковки партии металла одной марки по группам с прогнозируемыми параметрами кривой упрочнения.

**Список литературы:** 1. Кроха В. А. Упрочнение металлов при холодной пластической деформации / В. А. Кроха. – М. : Машиностроение, 1980. – 155 с. 2. Третьяков А. В. Механические свойства сталей при пластическом деформировании : справочник / А. В. Третьяков, Г. К. Трофимов, М. К. Гурьянов. – М. : Машиностроение, 1971. – 268 с. 3. Полухин П. И. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов : справочник / П. И. Полухин, Г. Я. Гун, А. М. Галкин. – М. : Металлургия, 1983. – 352 с. 4. Ковка и штамповка : справочник : в 4 т. Т. 1. Материалы и нагрев. Оборудование. Ковка / под ред. Е. И. Семенова. – М. : Машиностроение, 1985. – 568 с. 5. Хензель А. Расчет энергосиловых параметров в процессах обработки давлением : справочник / А. Хензель, Т. Шпиттель. – М. : Металлургия, 1982. – 360 с. 6. Марочник сталей и сплавов / под общ. ред. А. С. Зубченко. – 2-е изд., доп. и испр. – М. : Машиностроение, 2003. – 784 с. 7. Сопротивление деформации и пластичность при обработке металлов давлением / Ю. Г. Калтин [и др.]. – М. : Машиностроение, 2011. – 244 с.; 73 ил. 8. Людвиг П. Основы технологической механики // Расчеты на прочность. – М. : Машиностроение, 1970. – Вып. 15. – С. 130–166. 9. Губкин С. И. Пластическая деформация металлов : в 3 т. Т. 1. Физико-механические основы пластической деформации / С. И. Губкин. – М. : Металлургиздат, 1960. – 376 с. 10. Грушко А. В. Развитие использования метода твердости по Бринеллю для определения напряжения текучести при холодной деформации / А. В. Грушко // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2013. – № 1. – С. 36–39. – ISSN 0543-5749. 11. Грушко А. В. Определение параметров кривой течения материала по его твердости / А. В. Грушко // Обработка материалов давлением : сб. научн. трудов. – Краматорск : ДГМА, 2010. – № 2 (23). – С. 83–87. – ISSN 2076–2115. 12. Грушко А. В. Определение кривой течения материала по стандартным механическим характеристикам / А. В. Грушко // Вісник Національного технічного університету України «КПІ». Серія : «Машинобудування». – К. : НТУУ «КПІ», 2010. – № 60. – С. 133–137. – ISSN 2305-9001. 13. Грушко О. В. Побудова кривої течії матеріалу за границями міцності і текучості / О. В. Грушко, В. А. Огородніков, М. І. Побережний, М. П. Єленіч // Вісник ВПІ. – 2009. – № 6 (87). – С. 90–93. – ISSN 1997–9266.

Надійшла до редколегії 11.11.2013

УДК 620.178.152.28

**Изучение двухпараметрической степенной кривой упрочнения на основе твердости и характеристик прочности металла / Грушко А. В. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Нові рішення у сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2013. – №43 (1016). – С. 66–72. Бібліогр.: 13 назв.**

У роботі запропоновані методи побудови кривих зміцнення на основі стандартних механічних характеристик матеріалу – твердості Брінелля у поєднанні з даними границь міцності і текучості при розтягуванні. Апроксимація кривих зміцнення прийнята у вигляді степеневі функції за П. Людвігом. Побудовані номограми, показана особливість методів і їх точність на прикладі 8 різних матеріалів.

**Ключові слова:** крива зміцнення, твердість за Брінеллем, границя міцності, границя текучості, степенева функція.

The methods of construction of hardening curve on the basis of standard mechanical descriptions of material are in-process offered – to Brinell hardness in combination with data of tensile and fluidity strengths at tension. Approximation of hardening curve is accepted as a power law by P.Ludwig. Nomogrammy is built, the feature of methods and their exactness is rotined on an example 8 different materials.

**Keywords:** hardening curve, Brinell hardness, tensile strength, yield stress, power law.

УДК 621.735:669.131

**Д. А. ГУСАЧУК**, канд. техн. наук, доц., Луцький НТУ;  
**П. П. САВЧУК**, докт. техн. наук, проф., Луцький НТУ;  
**Ю. П. ФЕЩУК**, канд. техн. наук, доц., Луцький НТУ;  
**М. Д. МЕЛЬНИЧУК**, канд. техн. наук, доц., Луцький НТУ.

## **ВПЛИВ ТЕМПЕРАТУРИ НА ХАРАКТЕР ПЛАСТИЧНОЇ ДЕФОРМАЦІЇ ВИСОКОМІДИСТИХ ЧАВУНІВ**

В роботі досліджували особливості пластичної деформації високомідистих чавунів при підвищених температурах. Встановлено, що присутність високомідистої фази дозволяє підвищити ресурс пластичності сплавів. Наявність потовщеної оболонки високомідистої фази навколо первинних